

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Análisis del modelo eléctrico del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en el sector industrial de Bogotá

Analysis of the electrical model for the electric power theft mechanism widely used in the industrial sector in Bogotá

Yaqueline Garzón Rodríguez*, César Andrés Doncel Díaz**

Citation / Para citar este artículo: Garzón Rodríguez, Y., & Doncel Díaz, C. A. (2014). Análisis del modelo eléctrico del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en el sector industrial de Bogotá. Revista Tecnura, Edición especial, 45-63.

Fecha de recepción: 28 de marzo de 2013 / **Fecha de aceptación:** 7 de marzo de 2014

RESUMEN

Este trabajo se inscribe en la línea de Investigación de Compatibilidad Electromagnética y analiza el modelo eléctrico del mecanismo de hurto más implementado en medida semidirecta, con el fin de comprender el fenómeno físico que se encuentra y, a su vez, generar algunas recomendaciones respecto a las situaciones que pueden propiciar o permitir la implementación de este tipo de mecanismos utilizados en celdas de medida semidirecta en el sector industrial de la ciudad de Bogotá.

El trabajo se divide en cuatro partes; en la primera sección se hace referencia al proceso que se realizó para la obtención del mecanismo de hurto de energía eléctrica más utilizado en la ciudad de Bogotá, su jerarquización y descripción. En la segunda sección se presenta la elaboración del circuito eléctrico equivalente, así como las pruebas teóricas y experimentales efectuadas como parte de la comprobación de su funcionamiento. En la tercera sección se hace la documentación de las anomalías encontradas en las celdas de medida semidirecta, ya que se han identificado como principal causa de implementación de

mecanismo de hurto; por último, en la cuarta sección se presentan las recomendaciones de solución sugeridas a las anomalías encontradas en dichas celdas. Para establecer el modelo eléctrico se tomó como base el diagrama unifilar de medida semidirecta y se realiza circuito equivalente monofásico teniendo presente que el medidor y el transformador de corriente (TC) son los principales elementos en donde actúa este dispositivo. Acto seguido se efectúa el análisis mediante simulación del circuito, contemplando esta alteración mediante la herramienta Simulink en MATLAB, en la cual se identifica la anulación de la señal de corriente que se dirige al medidor a causa de la corriente inversa que proviene de la caja negra y, por ende, se verifica el bajo registro del consumo, como se evidencia en las curvas de potencia y energía en la carga.

Posteriormente se hacen pruebas experimentales, para lo cual se construye un prototipo y se efectúa medición con dos equipos diferentes. Como resultado, se identifica que el mecanismo de caja negra se implementa mediante un transformador de núcleo partido, que se instala en la fase a la cual se le

* Ingeniera en distribución y redes eléctricas, magíster en ciencias de la información y las comunicaciones. Docente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: ygarzonr@udistrital.edu.co

** Tecnólogo electricista, estudiante de ingeniería eléctrica. Asistente de presupuestos, IIE Ingeniería e Instalaciones Eléctricas. Bogotá, Colombia. Contacto: cadoncel@correo.udistrital.edu.co

hace la anulación de la corriente mediante un acople inductivo.

Palabras clave: Semidirecta, medida, hurto, mecanismo, acople inductivo, transformador, consumo, prototipo.

ABSTRACT

This work is classified under the line of Electromagnetic Compatibility Research and analyzes the electrical model for theft mechanism widely implemented for semi-direct measurement; in order to understand the physical phenomena found and, in turn it generating some recommendations regarding situations that may lead to or allow implementing such mechanisms used in semi-direct measurement cells in the industrial sector in Bogotá city.

This paper is divided into four excerpts, namely in the first section it refers to the process that was undertaken for the obtaining of the electricity theft mechanism most commonly used in Bogotá city, its ranking and description. In the second section it presents the development of the equivalent circuit, as well as theoretical and experimental tests conducted as part of the operational check. The third section is the documentation of the anomalies found

in the cells of semi-direct measurement as they are identified as the main cause of theft mechanism implementation, and finally, in the fourth section, it presents the recommendations solution suggested for the anomalies found in those cells.

To set the electric model, the semi-direct measurement line diagram was taken as a base, and monophasic equivalent circuit is done taking into account that the meter and current transformer (CT) are the main elements that operate this device. Right after, the analysis is performed by means of simulation of the circuit, considering this alteration through MATLAB Simulink tool, which identifies the cancellation of the current signal that goes to the meter because of the reverse current coming from the black box, and therefore consumption low register is verified, as evidenced by the curves of power and energy in the load.

Later, experimental tests are performed, for which a prototype is built and measurement is performed with two different teams. As a result, it is identified that the black box mechanism is implemented through a split core transformer, installed in the phase that performs the cancellation of the current through an inductive coupling.

Keywords: Semi-direct, measurement, theft, mechanism, inductive coupling, transformer, consume, prototype.

INTRODUCCIÓN

El régimen de los servicios públicos obliga a las empresas de servicios a que investiguen las desviaciones significativas de los consumos efectuados por los usuarios en un período frente a sus consumos anteriores (Ley 142, 1994, artículo 149); allí se establece que se debe hacer una investigación de estas desviaciones para elaborar las facturas y que es obligación de las empresas adoptar mecanismos eficientes que permitan someter su facturación a investigación de desviaciones significativas, entre el consumo registrado del suscriptor o usuario durante un período de facturación y sus promedios de consumos anteriores.

Ahora bien, configurada una desviación significativa, las empresas de servicios públicos están

obligadas a visitar los domicilios de los usuarios con el fin de determinar la causa que los originó. Esa facultad de visitar los inmuebles se ve enmarcada por la Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG, la cual ordena:

Control sobre el funcionamiento de los medidores. Las condiciones uniformes del contrato permitirán tanto a la empresa como al suscriptor o usuario verificar el estado de los instrumentos que se utilizan para medir el consumo; y obligarán a ambos a adoptar precauciones eficaces para que no se alteren. Se permitirá a la empresa, inclusive, retirar temporalmente los instrumentos de medida para verificar su estado.

(Resolución CREG 108, 1997, artículo 37).

Así mismo, la ley 142 de 1994 en su artículo 145, parágrafo 2° determina: “(...) La Empresa deberá practicar las visitas y realizar las pruebas técnicas que se requieran con el fin de precisar la causa que originó la desviación detectada en la revisión previa”.

Por este motivo, se hizo necesario generar acciones concretas para la descripción de mecanismos de hurto, como parte de las estrategias que deben emprender las empresas prestadoras del servicio de distribución de energía eléctrica para reducir las pérdidas económicas por falta de facturación. Por tanto, en este trabajo se hizo una revisión de los diferentes mecanismos de hurto más implementados en Bogotá, D.C., y se encontró que la “caja negra” es el de mayor implementación (SSPD, Concepto 111, 2002); partiendo de este resultado y teniendo en cuenta que este no tiene antecedentes de estudios específicos de su funcionamiento, se realiza el circuito eléctrico equivalente para comprender teóricamente cómo cumple el objetivo de evadir el pago real de energía eléctrica consumida.

Finalmente, con base en las diferentes situaciones encontradas en la implementación de mecanismos de hurto, se hace una serie de recomendaciones para afrontar las anomalías encontradas en el diseño de las celdas de medida semidirecta.

MECANISMO DE HURTO

Para poder determinar el mecanismo de hurto más implementado en Bogotá, D.C., se tuvo en cuenta la estadística de las inspecciones realizadas por la Compañía Americana de Multiservicios (CAM) para la empresa distribuidora y comercializadora de energía CODENSA S.A.E.S.P. Las inspecciones se efectúan periódicamente y sin previo aviso; de acuerdo con lo estipulado, estas inspecciones se hacen para detectar anomalías en las instalaciones y se enfocan en la revisión de los elementos de medida; las inspecciones se realizan de acuerdo con la metodología implementada por CAM y está descrita en la figura 1.

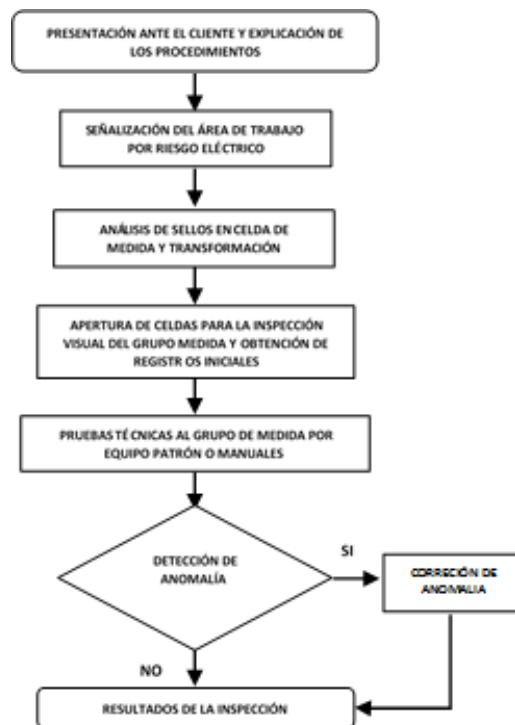


Figura 1. Flujograma de la metodología de inspecciones realizadas por CAM.

Fuente: Elaboración propia a partir de la metodología CAM.

Tabla 1. Descripción de los resultados de las inspecciones.

RESULTADO INSPECCIÓN	DESCRIPCIÓN
ACTUALIZAR	Por cambio de tarifa, doble facturación. Actualizar en el sistema general de CODENSA S.A. E.S.P
ADECUAR	No hay garantías suficientes para el correcto registro del consumo.
CAMBIO	Retiro e instalación de nuevo medidor por anomalías.
CORRECCIÓN	Condición anormal en el equipo de medida, instalaciones eléctricas y detección de anomalías.
FALLIDA	Cuando el inmueble no existe o no se puede localizar el predio.
INCORPORACIÓN	Usuario no registrado en el sistema comercial de la empresa.
INSTALACIÓN	Existe eliminación del servicio directo, medida de un nuevo suministro o instalación del medidor de energía reactiva.
NORMAL	La acometida, el equipo de medida y los elementos de seguridad se encuentran en perfecto estado.
REPROGRAMAR	Se necesita una nueva inspección.
RETIRO	Retiro de medidor por anomalías.
SELLOS AL LABORATORIO	Se presumen irregularidades en los sellos de los elementos del equipo de medida.
SERVICIO DIRECTO	Suministro no registrado por un medidor.
SIN SERVICIO	No existe servicio de energía.
SUSPENSIÓN DEL SERVICIO	Suspensión del servicio previa autorización del cliente.

Fuente: Elaboración propia a partir de la metodología CAM.

A partir de las inspecciones efectuadas se utilizan los términos descritos en la tabla 1 para identificar el resultado obtenido en dichas inspecciones. Cabe aclarar que por inspección solo se puede determinar un único resultado.

Con base en la clasificación de resultados obtenidos en las inspecciones, se encuentra que el término *corrección* es el que está directamente ligado con la detección de una anomalía o posible hurto.

A continuación se presentan los resultados de un total de 12.413 inspecciones efectuadas en el período comprendido entre junio y diciembre de 2011. Los datos se presentan en forma gráfica y referidos a la tabla 1, teniendo en cuenta los datos que hacen referencia a corrección con el fin de identificar causales de hurto.

Total de inspecciones efectuadas durante el período

En la figura 2 se evidencia que el porcentaje más alto del total de inspecciones efectuadas en este

período fue 41%, resultado que corresponde a equipo de medida y elementos de seguridad en perfecto estado; conforme a la clasificación dada en la tabla 1, pertenece al resultado de inspección NORMAL; pero con preocupación en segundo lugar porcentual con 19% se encuentra el término CORRECCIÓN, es decir, describe una condición anormal en el equipo de medida, instalaciones eléctricas y/o detecciones de hurto.

Teniendo en cuenta que el resultado CORRECCIÓN es el termino que nos indica y clasifica las diferentes anomalías, como puede ser la detección de hurto, se procede a hacer una revisión más puntual o específica de cómo se clasifican estas anomalías para este porcentaje, las cuales se encuentran descritas en la figura 3.

En esta gráfica se encuentra que el porcentaje más alto es 46%, equivalente a 1.100 inspecciones, y está directamente relacionado a las anomalías en celdas de medida, para este caso puntual a una referencia específica, bajo la normatividad (CODENSA S.A.E.S.P., AE319). Estas

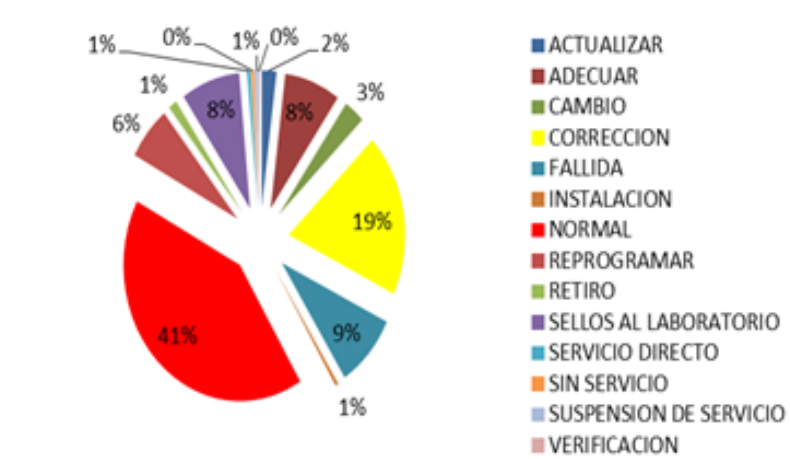


Figura 2. Resultado de inspecciones junio-diciembre de 2011.

Fuente: Elaboración propia.

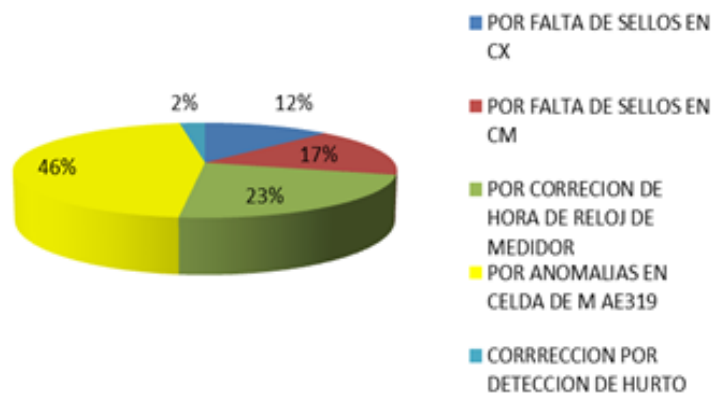


Figura 3. Tipos de anomalías.

Fuente: Elaboración propia.

anomalías son aprovechadas para implementar distintos mecanismos de hurto, los cuales no son fáciles de detectar por simple inspección visual y, por tanto, se requirió la revisión del historial de estos datos para poder dar un informe más cercano a la realidad. De esta revisión en la figura 3 se encuentra que el menor resultado porcentual pertenece a los mecanismos de hurto detectados *in fraganti*, con 2% correspondiente a 60 inspecciones. Haciendo una revisión más exhaustiva de este 2% de anomalías en la información

recopilada de las inspecciones para este período, en la figura 4 se identifican cuatro mecanismos de hurto encontrados *in fraganti*, como son: *bypass*, puenteo de señales, inversión de señales y caja negra, siendo el dispositivo de “caja negra” el mecanismo más utilizado para la ciudad de Bogotá, D.C., durante este período. De esta revisión se verifica que las condiciones que facilitan su implementación se asocian de manera directa a diferentes características de construcción en las celdas de medida AE319.

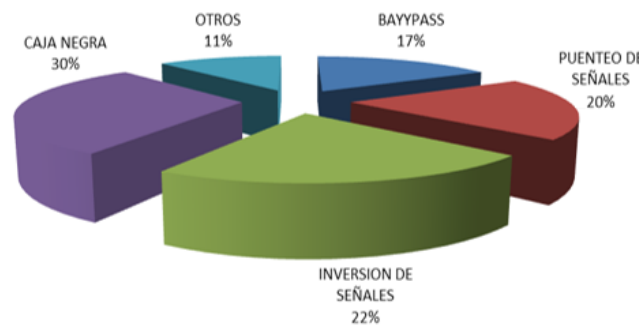


Figura 4. Mecanismos de hurto más utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización de los mecanismos de hurto más utilizados

A continuación, en las tablas 2, 3, 4 y 5 se presenta la descripción de cada uno de los mecanismos de hurto encontrados *in fraganti*, teniendo en cuenta su forma de detección y caracterización.

De acuerdo con las estadísticas y la caracterización de los mecanismos de hurto se encuentra que la “caja negra” fue el más implementado durante el período comprendido entre junio y diciembre

de 2011 en la ciudad de Bogotá, D.C. Adicionalmente, se considera el más complejo desde el punto de vista de que no se tiene informes de su operación e implementación y con la dificultad de detección por el elemento eléctrico utilizado en su implementación.

Bypass

Este mecanismo consiste en la modificación del flujo normal de energía hacia la carga para evadir su registro por el medidor, como lo muestra la figura 5.

Tabla 2. Caracterización del mecanismo de hurto *Bypass*.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
<ul style="list-style-type: none"> *Intervención de la acometida. *Afectación de la estructura civil (cajas de inspección, paredes, tubería). *No es visualmente detectable. *Puede tener 100% de eficiencia. 	<p>Se necesita comparar las corrientes de entrada con las que pasan por el medidor, que deben coincidir; de no ser así, se presume la existencia de un mecanismo de hurto <i>Bypass</i>.</p>

Fuente: Elaboración propia.

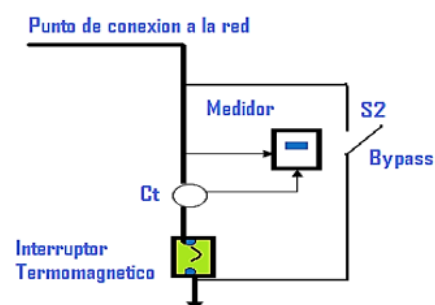


Figura 5. Diagrama unifilar de mecanismo de hurto *Bypass*.

Fuente: Elaboración propia.

Puenteo de CT

Consiste en utilizar un puente (alambre de cobre) para conectar las salidas del transformador

de corriente (CT) con el fin de disminuir el flujo al medidor por desviación, como muestra la figura 6.

Tabla 3. Caracterización del mecanismo de hurto por puenteo de CT.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
*Violación de sellos de seguridad de los CT.	Es posible observar anomalías en el aspecto de los bornes de los CT debido al arco que se produce en esta maniobra.
*Afectación de la estructura de la celda.	
*Detectable visualmente.	
*No tiene gran eficiencia por no garantizar la desviación total de corriente que se dirige al medidor.	

Fuente: Elaboración propia.

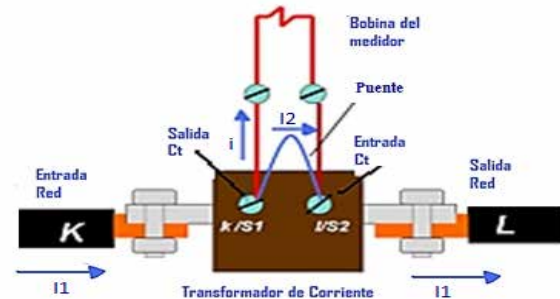


Figura 6. Esquema del mecanismo de hurto de puenteo de señales del CT.

Fuente: Elaboración propia.

Invertir señales de salidas de los CT

Consiste en invertir las señales de salidas de los CT que van al medidor y cambiar la dirección de la

corriente en las bobinas del medidor para que no exista registro por parte del medidor, como muestra la figura 7.

Tabla 4. Caracterización del mecanismo de hurto Invertir señales de salidas de los CT.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
*Violación de los sellos de seguridad de los CT o de caja de conexiones del medidor.	Se puede descubrir al verificar la conexión del medidor y comparar la carga instalada con los consumos mensualmente registrados.
*Afectación de la estructura de la celda.	
*Detectable visualmente.	
*Tiene gran eficiencia porque garantiza la desviación total de corriente que se dirige al medidor.	

Fuente: Elaboración propia.

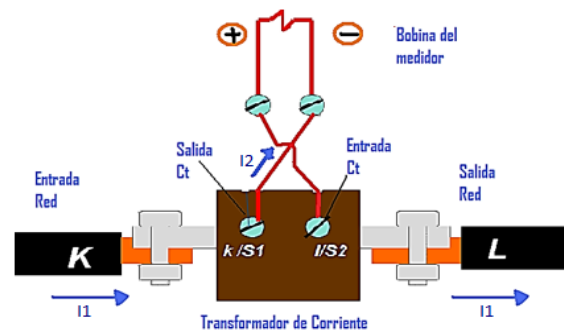


Figura 7. Esquema del mecanismo de hurto Invertir señales de salida en el CT.

Fuente: Elaboración propia.

Caja negra

Consiste en utilizar un transformador de corriente que envía una señal de corriente al medidor,

opuesta a la señal generada por los transformadores de corriente del grupo de medida, como muestra la figura 8.

Tabla 5. Caracterización del mecanismo de hurto Caja negra.

CARACTERÍSTICAS	DETECCIÓN
*Violación de los sellos de seguridad de los CT. *Afectación de la estructura de la celda. *Detectable visualmente. *No tiene gran eficiencia por no garantizar la desviación total de corriente que se dirige al medidor.	Es posible observar anomalías en el aspecto de los bornes de los CT debido al arco que se produce en esta maniobra.

Fuente: Elaboración propia.

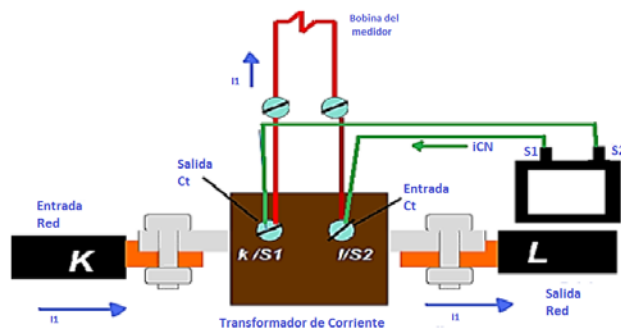


Figura 8. Esquema del mecanismo de caja negra.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Comparación % de pérdidas de los mecanismos de hurto.

MECANISMOS DE HURTO ENCONTRADOS							
Bypass		Puenteo de CT		Invertir señales de salidas de los CT		CAJA NEGRA	
Línea	Pérdidas [%]	Línea	Pérdidas [%]	Línea	Pérdidas [%]	Línea	Pérdidas [%]
R	33.3%	R	25%–30%	R	33.3%	R	33.3%
R-S	66.6%	R-S	50%–60%	R-S	66.6%	R-S	66.6%
R-S-T	100%	R-S-T	75%–90%	R-S-T	100%	R-S-T	100%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6 se detalla la comparación en porcentaje de pérdidas que arroja cada uno de estos mecanismos de hurto haciendo énfasis si su implementación se realiza en una sola línea o fase denominada “R”, en dos “R-S” o en las tres, “R-S-T”.

OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO ELÉCTRICO DE CAJA NEGRA

Una vez detectados y descritos los modelos de hurto se jerarquizó el mecanismo de hurto de caja negra como el más utilizado en la ciudad de

Bogotá. Este mecanismo se basa en alterar únicamente las señales de corriente generadas por el transformador y que se dirigen al medidor. En este aparte se describe la elaboración del circuito eléctrico equivalente, su simulación y análisis teórico, además de la comprobación calculada y corroborada con elementos de medida. Para este caso específico, se utilizó una medida semidirecta con transformadores de corriente con una relación de transformación de 200:5, de lo cual se resalta que la medida tiene un factor de liquidación por 40.

En primer término se realizó el circuito equivalente con base en la simbología establecida en el estándar (IEEE 315, 1993), luego se procedió a desarrollar el análisis teórico y simulación mediante herramientas del programa Simulink de Matlab. Por último, se construyó un prototipo de caja negra, el cual permitió hacer la comparación de los datos simulados con los obtenidos mediante dos equipos de medida diferentes: el equipo patrón ZERA MT 3000 y la pinza amperimétrica Erasmus.

Descripción del modelo eléctrico

Para establecer el modelo eléctrico se tomó como base el diagrama unifilar de la figura 9 de medida semidirecta con el fin de identificar los principales elementos y convertirlos en un circuito equivalente.

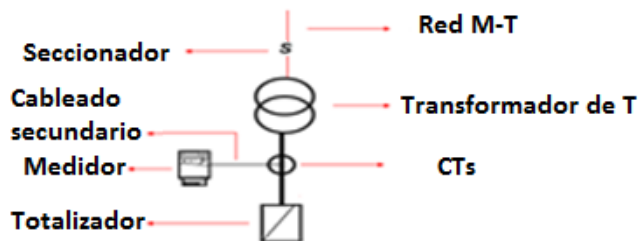


Figura 9. Diagrama unifilar de una medida semidirecta.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el medidor y el transformador de corriente (TC) son los principales elementos donde actúa la caja negra, se procede a convertir estos elementos en un circuito equivalente en una fase de acuerdo con las normas internacionales (IEEE 315, 1993); como se ilustra en la figura 10, el modelo se realiza monofásicamente ya que los transformadores son monofásicos y este mecanismo de hurto actúa directamente en el secundario de dicho elemento. El modelo eléctrico del medidor se toma del libro *Pérdidas de energía-enfoque operativo* (Orjuela, P., 2008).

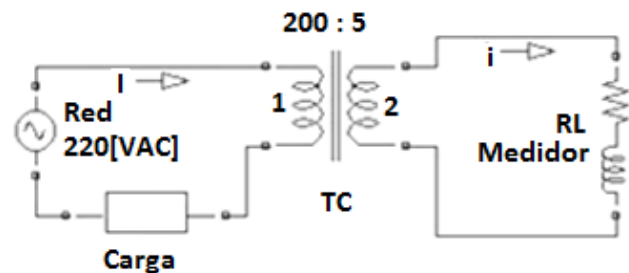


Figura 10. Circuito equivalente de medida semidirecta.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en el circuito obtenido de medida semidirecta, se acopla el mecanismo de hurto “caja negra” para obtener el circuito mostrado en la figura 11.

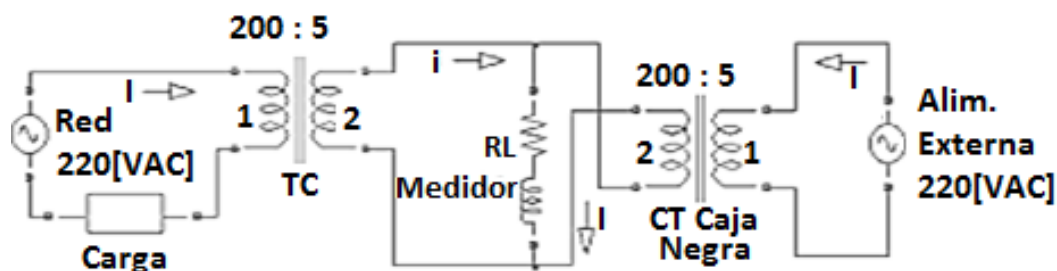


Figura 11. Circuito equivalente de medida semidirecta con caja negra.

Fuente: Elaboración propia.

Simulación y análisis Teórico

A continuación se describe la simulación y el análisis del modelo del circuito eléctrico, primero el circuito sin alteración de sus componentes, seguido del análisis de la simulación del circuito con alteración de la caja negra, utilizando la herramienta Simulink (MATLAB,2009).

Simulación del circuito equivalente en condiciones normales

En la figura 12 se puede observar el circuito equivalente de una medida semidirecta, en correcto funcionamiento y sin ninguna clase de alteración. En el gráfico se puede discriminar la dirección de la corriente de la red I y corriente del medidor i .

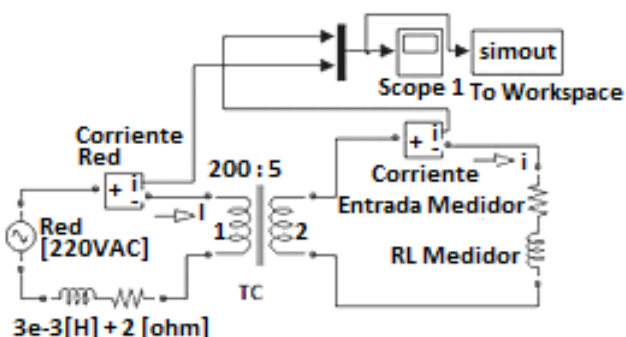


Figura 12. Simulación del circuito equivalente en condiciones normales.

Fuente: Elaboración propia.

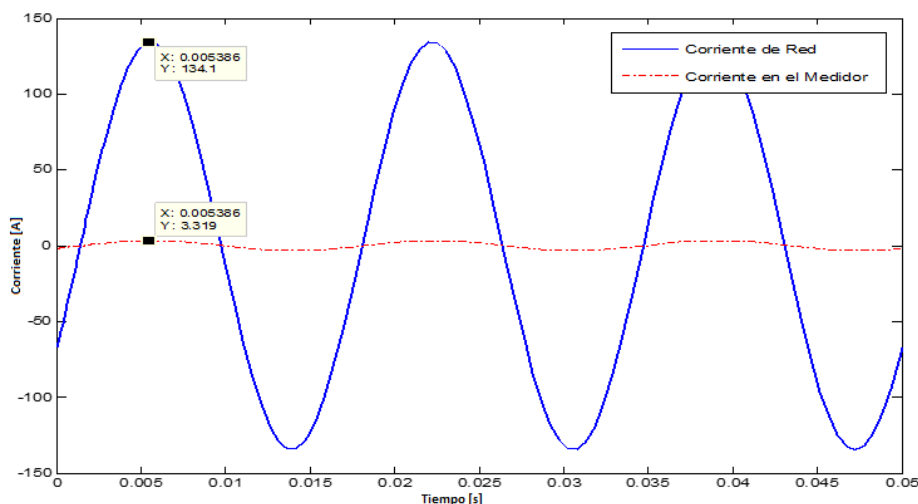


Figura 13. Corriente de red y corriente del medidor.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en el libro (Kemmerly, 2000) se hizo el circuito equivalente y la simulación correspondiente en Simulink, que arrojó las siguientes gráficas: la figura 13 muestra la relación entre la corriente de la red con valores pico de 134.1 A y la corriente del medidor con valores pico en 3.31 A, dado a la relación de transformación 200:5 A del CT, lo que indica un correcto funcionamiento del circuito.

En la figura 14 puede observarse la potencia activa que es de 18 kW, también denominada potencia útil; es la que realmente se aprovecha en el trabajo; por otra parte, se identifica la potencia reactiva de 10 kVAR, consumida por las bobinas presentes en la carga.

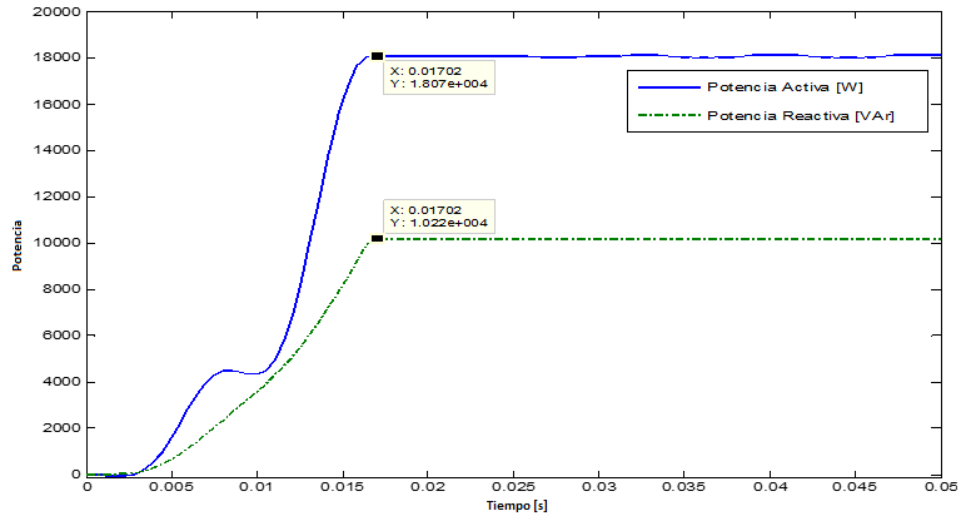


Figura 14. Potencia en la carga.

Fuente: Elaboración propia.

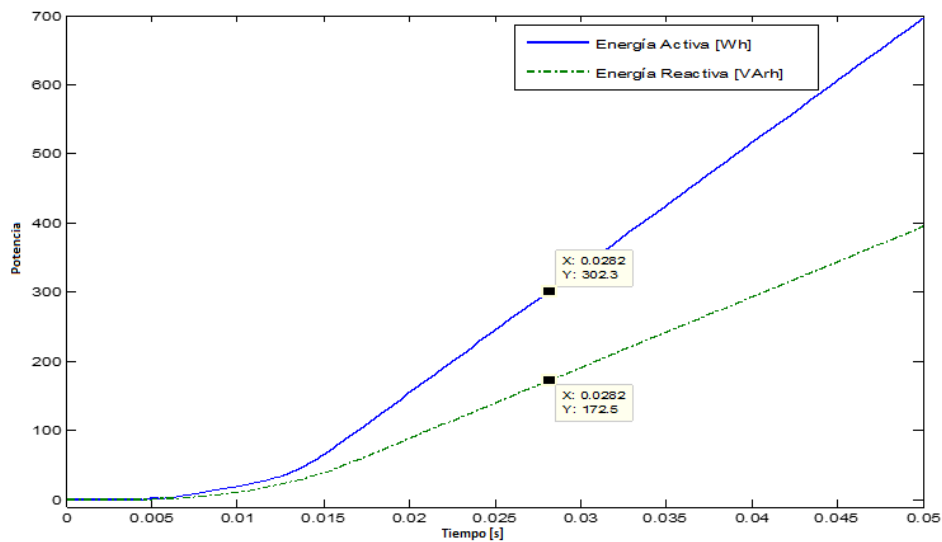


Figura 15. Energía consumida por la carga.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 15 se identifica la energía activa en vatios / hora y energía reactiva en voltamperios reactivos / hora consumida por la carga y que está siendo registrada correctamente por el medidor de energía.

Simulación del circuito equivalente con caja negra

De acuerdo con esta caracterización, se procedió a hacer la comprobación pertinente del mecanismo en el simulador Simulink, empezando por el diagrama del circuito equivalente con alteración

de caja negra; como resultado se obtienen las tres señales de corriente en el medidor, correspondientes a la corriente de entrada de red, corriente de caja negra y la corriente registrada por el medidor, tal como se ilustran en la figura 16.

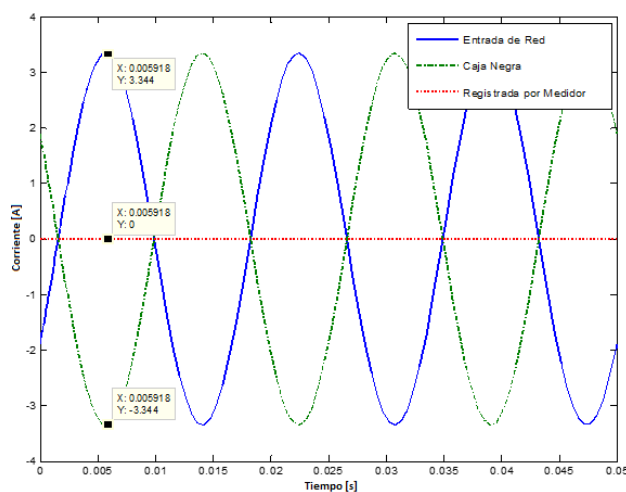


Figura 16. Corriente de la red versus corriente de caja negra y corriente resultante.

Fuente: Elaboración propia.

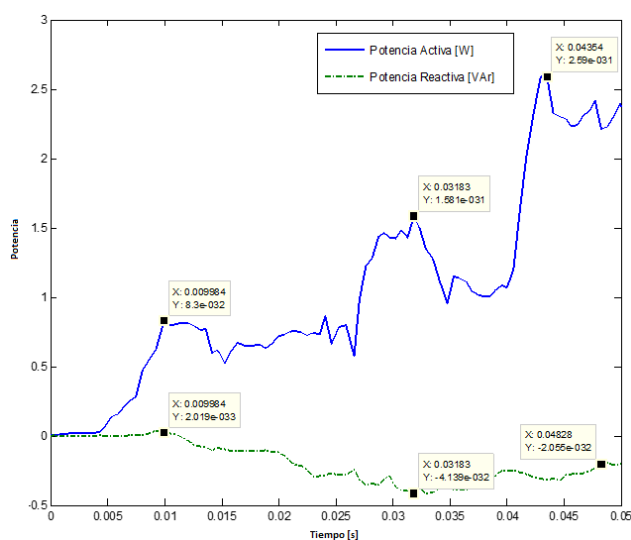


Figura 17. Potencia en el medidor con el mecanismo de hurto.

Fuente: Elaboración propia.

Al observar esta figura se puede relacionar la anulación de la señal de corriente que se dirige al medidor a causa de la corriente inversa que proviene de la caja negra y, por ende, verificar el bajo registro del consumo.

En las figuras 17 y 18 se aprecia que la potencia y energía del medidor se ven afectadas por el mecanismo de hurto disminuyendo las magnitudes a valores cercanos a cero, comprobándose el efecto del mecanismo de hurto de la caja negra para el no registro de la energía consumida.

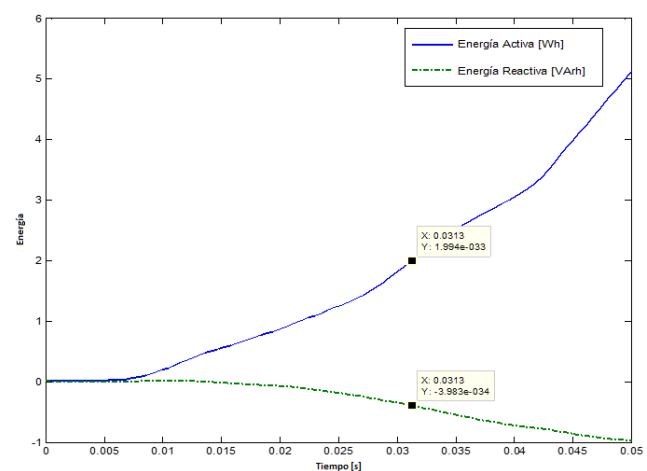


Figura 18. Energía registrada por el medidor con el mecanismo de hurto.

Fuente: Elaboración propia.

Criterios preliminares 2

Los principales elementos utilizados durante las pruebas experimentales fueron un transformador de corriente (de tipo ventana), un medidor electro-mecánico (como componente de una medida semi-directa), el equipo patrón de marca ZERA MT 3000 y la pinza Erasmus como elementos de medida.

Obtención de registros con equipo patrón ZERA MT 3000 3

Después de comprobar mediante la simulación las pérdidas de corriente por el mecanismo de hurto, se procedió a efectuar pruebas con el

equipo patrón ZERA MT 3000. Para comprobar que el grupo de medida está en perfectas condiciones se hacen inicialmente pruebas sin el mecanismo de hurto con el equipo patrón, y se observa que las corrientes y tensiones son iguales tanto en el medidor como en el equipo patrón. La comparación entre las corrientes de red y del medidor se efectúa mediante el equipo patrón con base en el factor de transformación propio del transformador de corriente. Para el montaje y conexión se tuvo en cuenta el manual de procedimientos del equipo patrón.

Comprobación en condiciones normales

En la figura 19 se muestra específicamente el diagrama de conexión del medidor con los parámetros de corrientes y tensiones de los cuales se tuvo lectura con el equipo patrón.

Los parámetros en condiciones iniciales del grupo de medida con base en la figura 19, como lo son (VLN) tensión de fase, (VLL) tensión de línea; (I) corriente en la red (i) corriente transformada que se dirige al medidor, (P) potencia activa, (Q) potencia reactiva y (S) potencia aparente, se describen numéricamente en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros obtenidos del equipo ZERA MT 3000.

	R	S	T	Datos de operación del sistema	
VLN[V]	122.054	122.306	122.53		
VLL[V]	211.366	212.185	211.921		
θ_V°	29.44	149.44	269.44	F[Hz]	60
I[A]	96.17	95.12	95.05	Sec	123
θ_I°	00.0	118.39	260.62	FP[PU]	0.87
P[W]	10438	10432	10430	$\Sigma P[W]$	31280
Q[Var]	5902	5900	5901	$\Sigma Q[Var]$	17700
S[VA]	11991	11989	11983	$\Sigma S[VA]$	35963

Fuente: Elaboración propia.

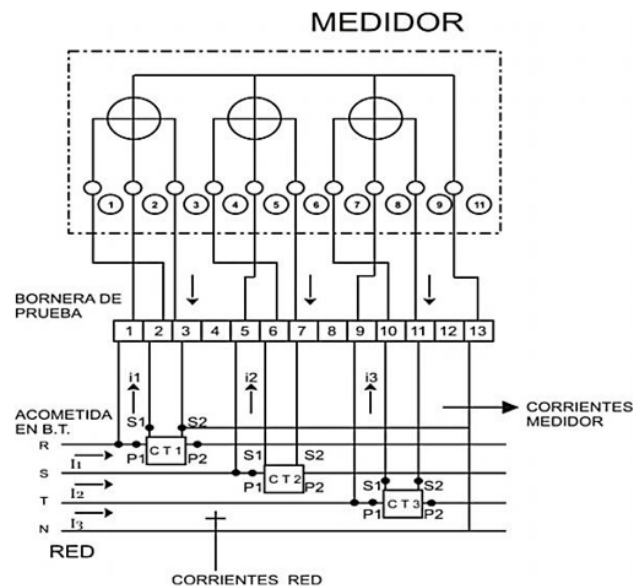


Figura 19. Diagrama de conexiones del grupo de medida semidirecta.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8 se demuestra que la relación de transformación de los CT se cumple para cada una de las corrientes por fase, como se evidencia en las corrientes I de la red con respecto a las corrientes i del medidor.

Tabla 8. Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

	R	S	T
VLN[V]	122.054	122.306	122.53
VLL[V]	211.366	212.185	211.921
θ_V°	29.44	149.44	269.44
I[A]	96.17	95.122	95.05
θ_I°	00.0	118.39	238.62
i[A]	2.404	2.371	2.376
θ_i°	00.56	117.42	238.62

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 20 se ilustra el diagrama vectorial de las señales de corriente en la red, el medidor y señales de tensión.

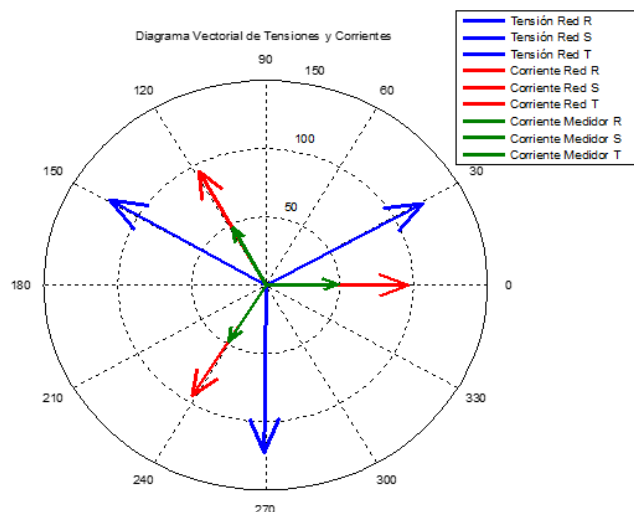


Figura 20. Diagrama vectorial de señales de corriente y tensiones obtenidas, ZERA MT 3000.

Fuente: Elaboración propia.

De la figura 20 se observa que señales de corriente y tensión se encuentran en fase debido a las características resistivas del circuito.

En la tabla 9 se hace una comparación de las magnitudes y ángulos entre las corrientes de red y las corrientes del medidor; a su vez estas corrientes se multiplican por el factor de transformación 40, con el fin de compararlas con las corrientes de red medidas por el equipo patrón, y así determinar el error porcentual entre magnitudes y ángulos. Se observa una diferencia mínima entre los dos datos, lo que garantiza un normal funcionamiento de la medida.

Tabla 9. Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

	I[A]	θ °	i[A]	θ i°	DIF MAG	DIF ANG
R	96.17	00.0	96.16	00.56	-0.01	-0.56
S	95.12	118.39	94.84	117.42	-0.29	-0.81
T	95.05	260.62	95.04	261.62	-0.01	-0.38

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se procedió a efectuar la comparación metrológica entre el equipo patrón y el medidor; esta comparación se realiza en forma automática por el equipo patrón con base en el número de giros registrados por el sensor que se instala sobre el medidor y que permite establecer la diferencia entre la energía de los dos equipos; para este caso se censó un giro del medidor y con la referencia que posee el equipo patrón del medidor, se indica un porcentaje de error, para este caso de -0.17%, el cual está dentro de los parámetros establecidos por la normatividad vigente en la (Ley 142, 1994, artículo 145).

COMPROBACIÓN CON MECANISMO DE HURTO

Para la comprobación del mecanismo de hurto con el equipo patrón ZERA MT 3000 se elaboró un prototipo de caja negra, el cual se presenta a continuación.

Elaboración del prototipo

Para la elaboración del prototipo de caja negra se utilizó un transformador de núcleo partido, por su fácil manipulación y sus características de funcionamiento y además porque se ha descubierto su utilización en la mayoría de casos *in fraganti*, pues este es instalado en la fase a la cual se hace la anulación de la corriente, como se aprecia en la figura 21. El mecanismo de hurto de caja negra se denomina así porque el transformador de núcleo partido se asemeja a una caja por su construcción y además por su color original de fabricación.

En la figura 21 se muestra específicamente la dirección de las corrientes y el diagrama de conexión del medidor y el mecanismo de hurto de caja negra.

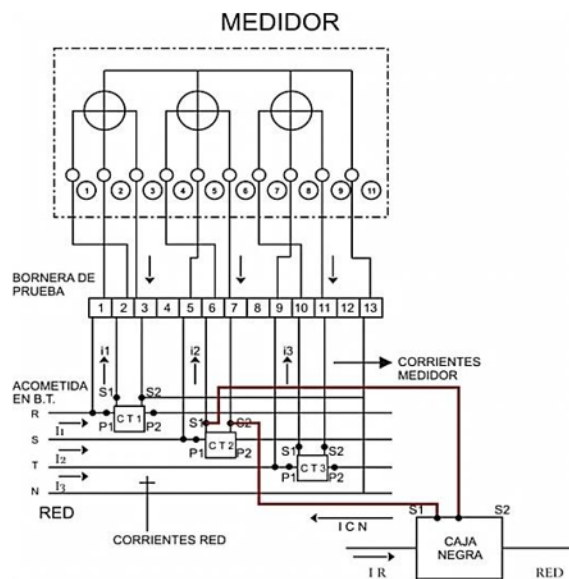


Figura 21. Diagrama de conexiones del grupo de medida semidirecta con mecanismo de hurto de caja negra.

Fuente: Elaboración propia.

El transformador de núcleo partido, prototipo de caja negra se instaló en la fase *S* de acuerdo con el diagrama de la figura 21 con las salidas invertidas y con la misma corriente de alimentación,

con el fin de eliminar la señal de corriente de la fase *S* al medidor para el no registro del consumo real. En la tabla 10 se demuestra que la relación de transformación de los CT no se cumple para la fase *S* ya que se puede observar que la corriente en *iS* es aproximada a cero, comprobándose así que la alteración del mecanismo de hurto es efectiva.

	R	S	T
VLN[V]	122.054	122.306	122.53
VLL[V]	211.366	212.185	211.921
θV°	29.44	149.44	269.44
I[A]	96.17	95.12	95.05
θI°	00.0	118.39	260.62
i[A]	2.404	0.01	2.376
θi°	00.56	117.42	261.62

Tabla 10. Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 22 se ilustra el diagrama vectorial de las señales de corriente en la red en el medidor y señales de tensión, en donde se observa que la magnitud de la corriente *is* es aproximadamente cero.

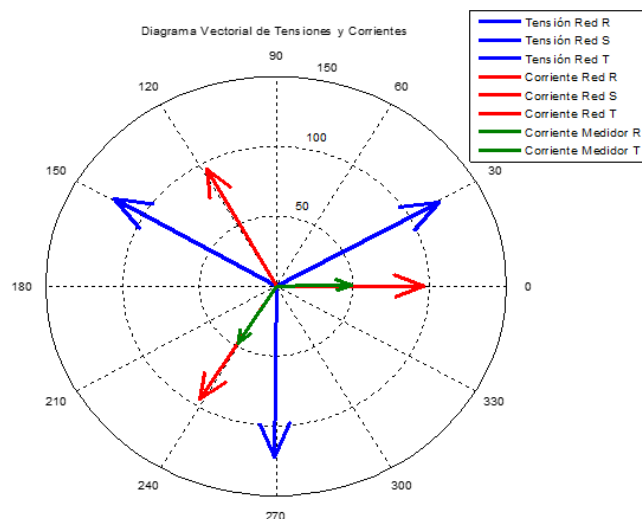


Figura 22. Diagrama vectorial de señales de corriente y tensiones obtenidas de ZERA MT 3000.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Comparación de corrientes de red y corrientes del medidor obtenidas del equipo ZERA MT 3000.

	I	θ_I	i	θ_i	DIF MAG	DIF ANG
R	96.17	00.0	96.16	00.56	-0.01	-0.56
S	95.12	118.39	0.40	0.02	-99.9	-99.9
T	95.05	260.62	95.04	261.62	-0.01	-0.38

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 se hace una comparación de las magnitudes y ángulos entre las corrientes de red y las corrientes del medidor, en la cual se observa un diferencia de -99.9% entre la corriente I_S de la red y la corriente i_S del medidor, verificándose así que la implementación de la caja negra alteró la señal de corriente del medidor y, por consiguiente, no hubo registro de la energía real consumida en esta fase.

Finalmente, se procedió a hacer la comparación metrológica entre el equipo patrón y el medidor; el porcentaje de error para este caso fue -32.99%; esto se debe a que la corriente del medidor en la fase S fue anulada por la caja negra.

Verificación manual

Para comprobar que los datos obtenidos por el equipo patrón son verídicos con el mecanismo de hurto caja negra se procedió a realizar las pruebas manualmente, utilizando una pinza amperimétrica para obtener parámetros de corriente y de tensión, y un cronómetro para censar el giro del disco del medidor. Los cálculos de potencias se efectúan con base en mediciones de tensión y corriente de la tabla 12.

Tabla 12. Parámetros de corrientes de red, corrientes del medidor y tensiones medidos con pinza amperimétrica Erasmus.

Fases	Corrientes Red [A]	Corrientes Medidor [A]	Tensiones [V]	FP [P.U]
R	95.7	2.404	211	0.87
S	95.6	2.371	212	0.86
T	96.1	2.376	211	0.87

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la energía registrada en el medidor se obtuvieron los datos descritos en la tabla 13.

Tabla 13. Datos característicos del medidor.

	Número de giros	Tiempo [s]	Constante
Activa	1	5.75	1200 R/kWh
Reactiva	1	8.13	1500 R/kWh

Fuente: Elaboración propia.

Las potencias de red y del medidor se presentan en la tabla 14, los cuales permiten comprobar que el porcentaje de error es -31%.

Tabla 14. Potencias calculadas.

Sred [kVA]	23.95
Smed [kVA]	35.06
Error [%]	-31.66
FP [P.U]	0.87

Fuente: Elaboración propia.

Error de transformación

El cálculo del error de transformación está basado en la norma internacional (IEC 61000-4-30, 2003), la cual proporciona la forma de calcular el error de relación que introduce un transformador en la medición, como se muestra en la ecuación (1).

$$\text{Error de corriente (EC) \%} = \frac{(Kn * (Is - Ip)) \times 100}{Ip} \quad (1)$$

De donde:

Kn es la relación de transformación nominal;

Ip es la corriente primaria real;

Is es la corriente secundaria real cuando Ip fluye, bajo las condiciones de medición.

Para verificar que el error de transformación introducido por el CT de la fase S esté dentro del rango permitido se calcula el error con las condiciones normales, como se indica a continuación.

$$EC \% = \frac{(40 * (2.37 - 95.12)) \times 100}{95.12} = -0.33\%$$




El error de relación de transformación calculado para este caso fue -0.33%, el cual está dentro de lo permitido en esta norma nacional (NTC 2205, 2009).



ANOMALÍAS ENCONTRADAS EN LAS CELDAS DE MEDIDA SEMIDIRECTA (AE19)

La construcción de la celda de medida semidirecta ha sido estandarizada por la Norma CODENSA S.A.E.S.P. AE319, 1998; estas especificaciones deben ser tenidas en cuenta por los constructores en el momento de la instalación por parte de CODENSA S.A.E.S.P., razón por la cual estos últimos interpretan la Norma de acuerdo con sus necesidades y no todas las celdas inspeccionadas cumplen los requerimientos.

Teniendo en cuenta lo anterior y a partir de las inspecciones hechas se logró determinar varias anomalías en las celdas de medida semidirecta que permiten la manipulación de los equipos de medida y que se describen en la tabla 15.

Tabla 15. Diferentes anomalías de la celda AE319.

CUADRO LISTADO ANOMALÍAS CELDA SEMIDIRECTA (AE319)		
ANOMALÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
1. SOBREDIMENSIONAMIENTO EN EL ORIFICIO DE ENTRADA DE ACOMETIDA	Se observa la amplitud del orificio de entrada de la acometida a los CT, el cual permite una manipulación de la medida porque excede la capacidad requerida entre 150% y 300%.	
2. DOBLE APERTURA DE ORIFICIO DE ACOMETIDA	Presencia de doble orificio con amplitud a los CT que permite una manipulación de la medida.	
3. SOBREDIMENSIONAMIENTO DE ORIFICIO DE PARCIAL	Orificio con amplitud por el cual se introduce la parcial porque excede la capacidad requerida entre 150% y 300%.	

CUADRO LISTADO ANOMALÍAS CELDA SEMIDIRECTA (AE319)		
ANOMALÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
4. DISEÑO DE BISAGRA EN EL EXTERIOR DE LA CELDA	Bisagra de celda externa que permite ser desoldada para hacer la apertura de la celda y que permite la manipulación del grupo de medida.	
5. AUSENCIA DE ORIFICIO EN EL ENTREPAÑO	Se observa que el entrepaño no brinda seguridad a la medida y que el orificio se encuentra en la parte de atrás y permite la manipulación manual del grupo de medida.	

Fuente: Elaboración propia.

Documentación de las sugerencias a las anomalías encontradas en las celdas de medida semidirecta AE319

Teniendo en cuenta las anomalías en las celdas de medida semidirecta se realiza un listado de

sugerencias relacionadas en la tabla 16; las sugerencias de las anomalías 1, 2 y 3 están basadas en la carga calculada para cada uno de los servicios, de acuerdo con (Rodríguez, 2012), y así se puede estandarizar estas medidas que no son muy claras en la (Norma AE319, 1998).

Tabla 16. Sugerencias para afrontar las anomalías encontradas en las celdas de medida semidirecta.

LISTADO DE ANOMALÍAS DE LA CELDA SEMIDIRECTA (AE319)	
ANOMALÍA	SUGERENCIA
SOBREDIMENSIONAMIENTO EN EL ORIFICIO DE ENTRADA DE ACOMETIDA	Para la elección del diámetro del orificio de entrada de la acometida en la celda AE319 se debe tener en cuenta la tabla 31, en donde se estandariza las medidas del orificio según el tipo de acometida previamente calculado.
DOBLE APERTURA DE ORIFICIO DE ACOMETIDA	Se debe estandarizar un solo orificio de entrada de acometida.
SOBREDIMENSIONAMIENTO DEL ORIFICIO DE PARCIAL	Para la elección del diámetro del orificio de salida de la parcial en la celda AE319 se debe tener en cuenta la tabla 31 y estandarizar las medidas del orificio según el tipo de acometida previamente calculado.
DISEÑO DE BISAGRA EN EL EXTERIOR DE LA CELDA	Instalar las bisagras de las puertas de celda AE319 internas para que no se puedan manipular y así impedir el acceso al grupo de medida.
AUSENCIA DE ORIFICIO EN EL ENTREPAÑO	Estandarizar los orificios de entrada de la acometida y orificio de parcial, y eliminar por completo el acceso por detrás del entrepaño.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Inicialmente se identifica que la Ley Eléctrica 142 no hace referencia a la frecuencia con que se debe hacer inspecciones en equipos de medida de energía eléctrica, lo cual en cierta medida facilita el uso e implementación de mecanismos de hurto en Bogotá, tales como el mecanismo de hurto de caja negra, que se establece como el más implementado en el sector industrial de la ciudad de Bogotá; lo anterior debido a que anula la señal de corriente vista por el medidor y, por consiguiente, evita el registro real del consumo de energía eléctrica.

Adicionalmente se evidenció que las fallas en el diseño de celdas de medida semidirecta (Norma AE319, 1998) facilitan la implementación de mecanismos de hurto, principalmente de tipo caja negra, para lo cual se recomienda que el diseño de las celdas de medida en mención se ajuste a los requerimientos de la carga contratada.

Finalmente, se comprueba que el uso de equipos patrón facilita la detección de instalaciones anormales y que pueden tener mecanismos de hurto.

FINANCIAMIENTO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REFERENCIAS

Codensa (1998). Norma Codensa S.A. E.S.P., AE 229, Acometida Subterránea de Baja Tensión. Bogotá.

Codensa (1998). Norma Codensa S.A. E.S.P., AE 319, Armario para instalación de Equipo de Medida y Transformador de Corriente en B.T. (Alternativas 3 y 4). Bogotá.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (Colombia) (1997). Resolución CREG 108, Artículo 37. Bogotá. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Icontec (2004). Norma Técnica Colombiana (NTC 2205) (29 de 09 de 2004)–Transformadores de corriente y medida del, Bogotá.

IEC, International Standard, 61000-4-30 (2003). Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Ginebra, Suiza.

Kemmerly, J. y W. H. (2000). *Análisis de circuitos en ingeniería* (3 ed.). McGraw-Hill.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia (1994). Ley Eléctrica, Ley 142–Artículo 149. Bogotá.

Ministerio de Minas y Energía (Colombia) (1994). Ley Eléctrica 143, Artículo 145. Bogotá.

Orjuela, P. (2008). *Pérdidas de energía–enfoque operativo*. 1ª. ed. Bogotá: CartoPrint Ltda.

Rodríguez, C. (2012). *Acometidas y Medidores / Pérdidas de Energía*. 1ª. ed. Quito.Society I.P. (1993).

IEEE, 315, Standard Canadian Standard Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams (Including Reference Designation Letter) IEEE Standard Boards.

Superintendencia de Servicios Públicos SSPD (Colombia) (2002). Concepto 111. Bogotá.

The Mathworks, Inc. (2009). Matlab 7.8.0.347, U.S.

ZERA MT 3000 (2008). *Manual, Equipo patrón*.



